

微より、パレート最適候補集合内において、各目的をバランスさせた解が得られやすい傾向にあることを明らかにしている。提案法により、需要量、印刷加工時における色の組合せが等しい品種の組合せを得ることができ、印刷ラインにおける総加工完了時間を最大で約45%、最低でも約32%減少できることを検証している。

第4章では、複数印刷ラインにおける段ボール箱製造スケジューリング問題を段取替回数と総ロス最小化の2つの目的を持つ多目的組合最適化問題として定式化を行い、解法としてGAの局所探索能力を補うために局所探索法(Local Search: LS)を併用したハイブリッドGAを用いた解法を提案している。提案法はパレート最適候補集合を一度の適用で効率的に得ることが可能であり、GAの大域的探索能力とLSの局所探索能力がうまく融合し、GAのみで探索を行うよりも解の精度や探索時間の面で優れた結果を得ることが可能であることを示した。更に、より実際の製造工程に近いモデルを用いて数値実験を行い、2品種同時製造における生産性向上の評価を行った。その結果、段取替回数については最大40%、最低10%の減少がみられた。

第5章では、本論文を次のように総括している。新たに設備投資を施さず生産性を向上させる手法として2品種同時製造を提案している。段ボール箱製造スケジューリング問題を多目的組合最適化問題に帰着させて数学的定式化を行っている。遺伝的アルゴリズムを用いた解法を提案し、1度の実行で複数のパレート最適候補を得ることが可能であり、本問題に対する近似解法として有効であるといえる。3章における数値実験により得られた解は総加工完了時間を現状より最大で約45%、最低で約32%減少させている。更に、4章では、実際の複数印刷ラインを設定した数値実験を行い、提案法はGAとLSと組み合わせたことにより優れた探索を行うことが確認できた。数値実験で得られた解を現状と比較すると、段取替回数においては、最大40%、最低10%減少できたが、総ロスに関しては、最大で約150%、最低で約10%の増加となった。

以上から、本論文で提案している段ボール箱の2品種同時製造法およびそのスケジューリング法は段ボール箱の生産性を飛躍的に向上させる可能性を示したものである。

以上、本論文で得られた成果は学術的にも工業的にも極めて意義のあるもので、博士(工学)論文として十分価値あるものと認める。

氏名	釜田圭市
学位の種類	博士(工学)
学位記番号	産第20号
学位授与の日付	平成18年3月22日
学位授与の要件	学位規定第4条第1項該当
学位論文題目	周波数領域ICAの成分置換に関する研究

論文審査委員(主査)	教授	五反田	博
(副主査)	教授	金光	滋
(副主査)	教授	久良修	郭

論文内容の要旨

人間は意思の疎通を図る道具として言葉を使う。言葉には話し言葉や書き言葉があり、話し言葉は情報を音声として伝える。人間と人間の間では瞬時に伝達され理解されるが、人間と機械との間にはその技術が確立されていない。そのため、人間とコンピューターとの間ではキーボードやタッチパネルなどの手動操作による情報の伝達が一般的である。しかし、近年、音声をコンピューターに取り込んで、それを認識させる音声認識技術が目覚ましく進歩している。現行の音声認識エンジンは、騒音のない理想的な環境下でならば、優れた認識能力を発揮する。しかし、現実の場では、周囲の雑音の影響を受けて認識能力は極端に低下する。これを回避するため、音声認識エンジンに入力する前に、雑音混じりの音から音声のみを抽出する技術の確立が望まれている。

人間は様々な音が飛び交う中で、特定の音に注意を向けて聞き分けることができる。これはカクテルパーティー効果と呼ばれ、脳が耳に入る様々な音を瞬時に処理して、その中で一番興味のある情報のみを選択・抽出していることによる。このカクテルパーティー効果を工学的に実現する課題は音源分離問題と呼ばれている。音源分離問題は、音源からマイク（マイクロフォン）までの伝達特性や音源そのものが未知という条件のもとで、複数の音源が混じり合った混合信号から元々の音源を復元する問題と定式化される。

音源分離問題に対して、最近、独立成分分析(ICA: Independent Component Analysis)に基づくアプローチが注目を集めており、数多くの方法が試みられている。ICAは、時間領域で分離を行う時間領域ICA(TDICA: Time Domain ICA)と周波数領域で分離を行う周波数領域ICA(FDICA: Frequency Domain ICA)の二つに大別される。また、ICAの立脚するモデルとして、瞬時混合モデルと畳み込み混合モデルの二つがある。瞬時混合モデルは、複数の音源を空間的に混合したモデルで、その伝達特性は実定数で表される。畳み込み混合モデルは、空間的な混合に加えて時間的な混合を考慮したモデルで、個々のマイク間の距離の違いによる時間遅れや反射の影響を考慮したモデルである。そして、その伝達特性はインパルス応答で表現される。

瞬時混合モデルの場合、スケーリングの不定性や成分置換の不定性を除いて、元の音源は完全に復元できる。しかし、実環境下では、畳み込み混合モデルとして定式化する必要があり、このモデルの下で音源分離する問題はブラインドソースデコンボリューション(BSD: Blind Source Deconvolution)問題と呼ばれる。BSD問題におけるICAアルゴリズムの設計をTDICAで行うと、フィルターの次数が数千と膨大となり、計算負荷や収束の問題が起きる。そのため、実環境下では一般にFDICAが用いられる。これは、時間信号をフーリエ変換により周波数領域へ変換することで、時間領域での畳み込みが周波数領域では積として表現されることによる。つまり、個々の周波数でのスペクトルとして変換された混合信号は、複素数値の伝達特性と音源の積として表現されて、時間領域における瞬時混合モデルのときと同様に簡単なアルゴリズムで音源分離ができる。しかし、FDICAには、スケーリングや成分置換の不定性の問題が個々の周波数で起きるため、そのまま時間領域へ戻しても、復元音声には歪みやクロストークが含まれて音質が劣化する。したがって、FDICAによる音源分離の場合、これら二つの不定性は本質的に解決しなければならない問題となる。

スケーリングの不定性に対して、Murataらは、分割スペクトルの概念を導入して、分割スペクトルの和が混合信号のスペクトルと等しいことから、分割スペクトルにはスケーリングの不定性がないことを明らかにしている。同時に、成分置換の不定性に関しても、音声などの非定常信号は異なる周波数で類似の時間構造をとるとする知見に基づいて、一つの解消法(包絡法)を提案している。この方法は汎用的であるが、スペクトル系列の連続性を無視したアルゴリズムになっている。そのため、ある繰り返しステップでの周波数における成分置換の是正結果が他の周波数での成分置換の是正に波及するという欠点がある。また、最終的には是正された信号と元の音源との対応関係については、別途の手段に委ねる必要がある。

一方、信らは、音源とマイクの位置関係から想定される伝達特性の差を利用して、成分置換の解消法(位置情報法)を提案している。しかし、実環境下では、残響の影響を受けてICAの分離精度が劣化するため、伝達特性の差が反転して十分な是正

能力が得られないことがある。また現実には、伝達特性の差を予め想定できる環境は限られる。

本論文では、音声と雑音の従う確率分布が異なることに着目して、新たな成分置換の解消法を提案した。すなわち、音声の分布は、中心部に値の集中する先の尖った形状をしているのに対して、雑音の分布は中心から離れたところにも値が散在して音声の分布より中心部への集中度合いが少ないことに基づいて、エントロピーを評価量とした成分置換の解消法を提案した。そして、本提案法の有効性を一般的な室内や走行車両の実環境下での実験により検証した。その結果、提案法は、包絡法や位置情報法に比べて、成分置換の是正能力が高く、実環境下でも頑健に機能することが確認された。また、ICAの場合、音源と復元信号の対応付けには自由度があるため、最終的にはこの対応付けの曖昧さも解決する必要がある。包絡法や位置情報法ではこの対応付けが困難で現実的には別途の手段に委ねなければならないが、提案法では自動的にできるという利点がある。

以下に本論文の流れを示す。

まず、第1章で本研究分野での発展の推移、研究の背景、目的について、また、第2章で信号分離問題における混合過程と分離過程のモデルについて述べた。

第3章では、まず、ICAを概説し、独立性の評価を与えるコスト関数について述べた。次に、ICAアルゴリズムとして、最急降下法、自然勾配法、時間相関法、FastICA法を瞬時混合の場合について説明した。さらに、ICAではスケーリングと成分置換の不定性が存在することを述べた。

第4章では、まず、実環境下での音源分離法としてFDICAについて述べた。その中で、周波数領域ではスケーリングと成分置換の不定性を解消することが本質的に重要であることを説明した。そして、スケーリングの不定性については、分割スペクトルの概念を導入することで解消できることを示し、分割スペクトルの物理的な意味を明確にした。また、成分置換の不定性に対しては、その解消法である既存法(包絡法と位置情報法)について述べるとともに、これらの方法の問題点を指摘した。

第5章では、まず、時間領域における音声と雑音の分布の違いについて説明し、この違いが周波数領域での分割スペクトルについても反映されることを示した。次に、音声と雑音の分布の違いは、一般に尖度を用いて判別できるが、尖度は異常値や信号源とマイクの距離の変化に対して脆弱であるため、評価量としての頑健性に欠けることを指摘した。そこで、分布の不確実度を表すエントロピーを新たな評価量として導入し、両者のエントロピーの比較から音声と雑音を判別する成分置換の是正法を提案した。さらに、本是正法に従えば、成分置換を解消するだけでなく、音源と復元信号の対応付けも自動的に行えることを明らかにした。

第6章では、バーチャルルームや実環境下で得られた各混合信号に対してFDICAアルゴリズムを適用し、成分置換の是正にそれぞれ提案法、包絡法、位置情報法を適用した。そして、最終的な分離能力をSN比と成分置換解消率によって比較し提案法の有効性を確認した。

最後に第7章で以上を総括した。

論文審査結果の要旨

音源分離問題に対して、独立成分分析(ICA)に基づくアプローチが注目を集めており、数多くの方法が提案されている。ICAは、時間領域で分離を行う時間領域ICA(TDICA)と周波数領域で分離を行う周波数領域ICA(FDICA)の二つに大別される。音源からマイクまでの混合過程に時間遅れや畳み込みがなく、混合行列の要素が実定数で表される理想的な環境を想定した混合モデルは瞬時混合モデルと呼ばれ、この場合、スケーリングや成分置換の不定性を除いて、元の音源は完全に復元できる。しかし、実環境下では、音源と個々のマイク間の距離の違いによる時間遅れの他に、個々のマイクで收音される音に反射や残響の影響があるため、畳み込まれて観測される混合信号に配慮したICAアルゴリズムの設計が必要となる。しかし、この設計をTDICAで行うと、フィルターの次数が数千にも及ぶことになって計算負荷や収束の問題が起きることになる。そのため、実環境下では、収束や計算負荷の面で優れているFDICAが一般的によく用いられる。しかし、FDICAでは、ICA固有のスケーリングや成分置換の不定性の解消が不可欠な課題として残る。

スケーリングの不定性は、分割スペクトルの概念を導入することで解消できる。一方、成分置換の不定性は、これまで数々の方法が提案されてきている(包絡法、位置情報法)が、いずれも実用の具となるまでには至っていない。

本論文は、音源に音声と雑音を考えた場合、分割スペクトルの分布形状の差違を定量的に評価することで、成分置換を是正する方法を提案したものである。音声と雑音の分布は、一般に尖度と呼ばれる統計量を用いて判別することができるが、尖度は異常値や音源・マイク間距離の変化に脆弱であることを述べている。そこで、これに代わる新たな評価基準としてエントロピーを導入し、エントロピーが尖度に比べて音源・マイク間距離の変化に頑健であることを示している。そして、この評価基準に基づいて頑健な成分置換の是正法を提案している。この是正法に従えば、成分置換を解消するだけでなく、音源と復元信号の対応付けも行えることを明らかにしている。

また、提案法の有効性を実環境下で検証し、成分置換是正能力が包絡法では騒音レベルに、また位置情報法では残響に依存して低下することを示している。これに対して、提案法では騒音レベルや残響に依存することなく既存法より高い是正能力を示し、従来法に比べて優れた成分置換是正法であることを明らかにしている。

以上のように、本論文は成分置換の解消法について、既存法のもつ騒音レベルや残響に対する脆弱性を解消する方法を提案したものであり、その有効性は音源分離問題の解決に寄与するところが大きい。よって本論文は、博士(工学)の学位論文に値するものと認める。